

## **Modelo de Análisis para la Planificación y Selección de Proveedores Industriales de Productos de Innovación con Procesos Establecidos en Cadenas de Suministro<sup>84</sup>**

**José-Luis Calderón-Lama<sup>1</sup>, José P. García-Sabater<sup>2</sup>, Francisco-Cruz Lario<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de la Producción (CIGIP). UPV. Camino de Vera s/n, Edificio 8G - Ingreso D - Nivel 1. Valencia. [jocalla@doctor.upv.es](mailto:jocalla@doctor.upv.es) y Departamento de Ingeniería Industrial de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Piura. Av. Ramón Mugica 131 – Piura – Perú. [jcaldero@udep.edu.pe](mailto:jcaldero@udep.edu.pe)

<sup>2</sup> ROGLE. Departamento de Organización de Empresas Universidad Politécnica de Valencia. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. España. [jpgarcia@omp.upv.es](mailto:jpgarcia@omp.upv.es)

<sup>3</sup> Centro de Investigación Gestión e Ingeniería de la Producción (CIGIP). UPV. Camino de Vera s/n, Edificio 8G - Ingreso D - Nivel 1. Valencia. [fcario@omp.upv.es](mailto:fcario@omp.upv.es)

### **Resumen**

*En este documento se presenta un modelo matemático determinista multiproducto para la planificación táctica de la producción de artículos de innovación (como son los productos de moda de una sola temporada) con procesos establecidos (con tecnología conocida), con dos o más alternativas de aprovisionamiento y dos o más niveles de materiales (lista de materiales). El modelo incluye la posibilidad de aplazar los procesos de subensamble y de montaje final, además considera varios medios y tiempos de transporte, capacidad finita en cada recurso de producción, almacén y transporte, y limitación del presupuesto para la compra de materiales.*

**Palabras clave:** Planificación Táctica, Evaluación de Proveedores, Cadena de Suministro

### **1. Introducción**

Actualmente, las cadenas de suministro abarcan empresas en distintos países, que planifican y coordinan sus capacidades (de producción, almacenamiento, transporte, etc.) para brindar al mercado productos en el tiempo, cantidad, variedad y coste adecuados. Por ejemplo la industria de la confección tiene el diseño, producción de telas, corte, costura y venta al por menor en diferentes partes del mundo (Fisher et al. 1994). Muchas otras industrias, tales como equipo de telecomunicaciones y ordenadores, electrónica de consumo y juguetes, tienen una estructura de cadena de suministro semejante debido a los bajos costes de mano de obra de países del sudeste asiático, China, Centro América, etc. (Christopher et al., 2006). Esto obliga a planificar la producción abarcando dos o más niveles (montaje final, submontaje, fabricación de componentes, etc.) en dos o más empresas ubicadas en distintos países.

---

<sup>84</sup> El presente trabajo se enmarca dentro de las investigaciones realizadas conjuntamente entre el Departamento de Organización de Empresas y el Instituto Tecnológico de Informática de la Universidad Politécnica de Valencia dentro del proyecto Nuevos Algoritmos Bio-Inspirados en Logística Avanzada, presentado al Programa de Cooperación Tecnológica entre Centros de Investigación y Tecnología subvencionado por el Instituto para la Pequeña y Mediana Empresa de la Generalitat Valenciana.

El presente documento analiza la planificación de la producción de artículos de innovación (como los productos de moda de una sola temporada) con procesos establecidos (con tecnología madura), demanda concentrada en dos o tres meses del año (aunque el resto del año hay una pequeña demanda) y dos o más alternativas de aprovisionamiento, un proveedor local (en el mismo país) y un proveedor lejano (en otro continente) por lo menos. Además considera la posibilidad de aplazamiento (*postponement*) tanto en las etapas de proceso del proveedor lejano como en el propio país.

Leung y Ng (2007b) han analizado el problema de un proveedor en un país lejano y muestran que en todos los casos (diferentes escenarios y distintos costes de escasez) es preferible el plan de producción con aplazamiento al plan de producción sin él, y que el ahorro es mayor cuanto mayor es la demanda y cuanto mayor es el coste de escasez.

En Calderón et al. (2008) se presenta un estado del arte de la planificación de la producción para la contratación de producción a proveedores industriales en una Cadena de Suministro. Arntzen et al. (1995), Lee et al. (2002), Chern y Hsieh (2007), Barbarosoglu (2000), Leung y Ng (2007a) y Peidro et al. (2007) han tratado el problema abarcando distintas partes del mismo y contribuyendo con diferentes enfoques. El presente trabajo se basa en los aportes de estos autores.

El resto del trabajo se organiza como sigue, en el segundo apartado se plantea el problema. En el tercer apartado se presenta el modelo desarrollado. En el cuarto se muestran las condiciones de los contratos y cómo se satisfacen. Las conclusiones se incluyen en el quinto apartado de este estudio.

## **2. Planteamiento del Problema**

Este estudio abarca el caso general de Cadenas de Suministro integradas por empresas que diseñan productos de temporada y subcontratan la fabricación a distintos proveedores tanto nacionales como extranjeros (en países cuyo coste de producción es muy bajo). El número y localización de los proveedores es conocido. Los productos tienen demanda estacional con un pico alto en sólo dos o tres meses al año, luego del cual los productos pierden valor de mercado (teniendo un precio de remate muy bajo que puede estar incluso debajo del coste). El precio de los productos terminados es conocido y fijo hasta que acaba el pico de demanda.

Por lo anterior, la empresa debe planificar la producción de  $i$  productos en función de previsiones de demanda de los productos finales (sólo éstos tienen demanda externa), considerando dos o más niveles de componentes (lista de materiales) que pueden ser compartidos o no entre los diferentes productos, abarcando todo un año y actualizando el plan cada periodo (horizonte rodante truncado al periodo  $T$ ) para subcontratar la producción “en firme” de los siguientes dos o tres periodos e “indicativa” de allí en adelante (considerando además que el tiempo de envío de los proveedores extranjeros es mayor a un periodo). También se considera que la capacidad de los proveedores es finita pero distinta para cada periodo de tiempo y que el coste de las materias primas es diferente para cada proveedor. En el caso del proveedor local se supone un plazo de entrega menor o igual a un periodo (una semana).

El problema en sí consiste en decidir las cantidades de los distintos ítems (productos terminados –**pt**–, productos intermedios y componentes) a subcontratar a los proveedores en cada periodo de tiempo en función de sus tiempos de producción y transporte, los medios y costes de transporte, y los costes de producción, inventario y entregas diferidas (sólo los **pt**

tienen entregas diferidas). Todos los costes pueden ser diferentes en los distintos periodos de tiempo y, especialmente en el caso de las entregas diferidas, el coste puede ir aumentando a medida que se aproxime al final del horizonte de planificación. El problema incluye además la posibilidad de aplazar el montaje parcial y el ensamble final de los productos en función de los costes de producción, transporte y almacenaje (de los componentes, productos intermedios y pt), y la posibilidad de hacer envíos (de los proveedores extranjeros a los proveedores nacionales) de componentes, productos intermedios y pt, para su almacenamiento y ensamble final local. Esto quiere decir que cada proveedor puede fabricar los productos finales de dos maneras: directamente de materias primas a producto terminado (productos directos) o producir componentes y almacenarlos, luego fabricar productos intermedios y almacenarlos, y finalmente ensamblar pt (estos últimos son llamados productos indirectos). En la nomenclatura del modelo propuesto se asigna los primeros  $F$  números “ $i$ ” a los productos terminados directos y del  $F+1$  al  $2F$  a los indirectos.

### 3. Modelo propuesto

El presente modelo se basa en el trabajo de Peidro et al. (2007) pero se le incorpora estructuras de materiales alternativas y se le añade la posibilidad de hacer aplazamiento; luego se ejecuta con horizonte rodante de manera que se satisfagan los requerimientos de los proveedores (agregando una restricción).

El modelo permite determinar:

- Plan de producción de cada proveedor.
- Plan de transporte entre nodos (proveedores extranjeros y nacionales).
- Cantidad de ventas y beneficio final.
- Nivel de inventario de cada nodo.
- Todos los costes.

#### 4.1. Nomenclatura

##### 3.1.1. Índices / Conjunto

Índices / Conjunto	Significado
$t \in T$	Periodos ( $t = 1, 2, \dots, T$ )
$i \in I$	Productos (materias primas, productos intermedios y productos terminados directos e indirectos). Si se fabrican $F$ pt directos $i = 1, 2, \dots, F, F+1, \dots, I$
$n \in N$	Nodos de la CS ( $n = 1, 2, \dots, N$ )
$j \in J$	Recursos de producción ( $j = 1, 2, \dots, J$ )
$l \in L$	Modos de Transporte ( $l = 1, 2, \dots, L$ )
$ip \in IP$	Productos de nivel inmediato superior en la lista de materiales ( $ip = 1, 2, \dots, IP$ )
$id \in ID$	Productos directos ( $id = 1, 2, \dots, ID$ )

$no \in NO$	Nodos de origen para transportes ( $no = 1, 2, \dots, NO$ )
$nd \in ND$	Nodos de destino para transportes ( $nd = 1, 2, \dots, ND$ )

### 3.1.2. Costes

Costes	Significado
$CPV_{ijnt}$	Coste variable de producción por unidad del producto $i$ en $j$ en $n$ en $t$
$CPE_{njt}$	Coste de horas extra en el recurso $j$ en $n$ en $t$
$CPO_{njt}$	Coste de tiempo ocioso en el recurso $j$ en $n$ en $t$
$CMP_{int}$	Coste por unidad de la materia prima $i$ en $n$ en $t$
$CTN_{inondlt}$	Coste de transporte por unidad de $i$ de $no$ a $nd$ por medio de $l$ en el periodo $t$
$CIN_{int}$	Coste por unidad de inventario de $i$ en $n$ en $t$
$CED_{int}$	Coste de entregas diferidas de $i$ en $n$ en $t$
$PV_{int}$	Precio de venta de cada producto terminado $i$ en $n$ en $t$

### 3.1.3. Otros datos

Otros datos	Significado
$LMI_{ip,in}$	Cantidad de $i$ para producir una unidad de $ip$ en $n$
$LMD_{id,in}$	Cantidad de $i$ para producir una unidad de $id$ en $n$
$CMAX_{nt}$	Monto máximo para compras del nodo $n$ en el periodo $t$
$D_{int}$	Demanda del producto $i$ en $n$ en $t$
$MAXPN_{njt}$	Capacidad máxima de producción en horas normales en $j$ , $n$ y $t$
$MAXHE_{njt}$	Capacidad máxima de producción en horas extra en $j$ en $n$ en $t$
$Inv_{in0}$	Cantidad en inventario del producto $i$ en $n$ en $t=0$
$MINP_{ijnt}$	Mínima cantidad a producir de $i$ en $j$ en $n$ en $t$
$ED_{in0}$	Entregas diferidas del producto $i$ en $n$ en $t=0$
$RTNI_{inondlt}$	Cantidades de $i$ a recibir en $nd$ proveniente de $no$ por medio de $l$ en los periodos $t= 1, 2, \dots, TTN$
$TCN_{inondl0}$	Cantidad en transporte de $no$ a $nd$ por medio de $l$ en el periodo

	$t = 0$
$TTN_{nondlt}$	Tiempo de transporte de $no$ a $nd$ por medio de $l$ en el periodo $t$
$TP_{inj}$	Tiempo de producción por unidad de $i$ en $j$ en $n$
$V_i$	Volumen físico del producto $i$
$VMAXL_{nt}$	Capacidad máxima de transporte de $l$ en $t$
$VMAXI_{nt}$	Capacidad máxima de inventario en $n$ en $t$

### 3.1.4. Variables binarias

VARIABLES BINARIAS	SIGNIFICADO
$X^1_{nondlt}$	Variable que toma el valor de 1 si $TTN_{nondlt} > 0$ , y 0 para los demás casos
$X^2_{nondlt}$	Variable que toma el valor de 1 si $TTN_{nondlt} = 0$ , y 0 para los demás casos

### 3.1.5. Variables de decisión

VARIABLES DE DECISIÓN	SIGNIFICADO
$P_{inj}$	Producción (cantidad) de producto $i$ en $j$ en $n$ en $t$
$S_{int}$	Suministro (cantidad) de producto $i$ en $j$ en $n$ en $t$
$ED_{int}$	Entregas diferidas de $i$ en $n$ al final del periodo $t$
$TNN_{inondlt}$	Cantidad de $i$ despachada de $no$ a $nd$ por medio de $l$ en el periodo $t$ con $no \diamond nd$ y $CTN_{inondlt} > 0$
$RTN_{inondlt}$	Cantidad de $i$ recibida en $nd$ proveniente de $no$ por medio de $l$ en el periodo $t$ con $no \diamond nd$ y $CTN_{inondlt} > 0$
$TCN_{inondlt}$	Cantidad de $i$ en transporte de $no$ a $nd$ por medio de $l$ en el periodo $t$ con $no \diamond nd$ y $CTN_{inondlt} > 0$
$Inv_{int}$	Cantidad en inventario del producto $i$ en $n$ al final del periodo $t$
$CC_{int}$	Cantidad comprada de $i$ en $n$ en $t$
$Tex_{njt}$	Horas extra trabajadas en el recurso $j$ en $n$ en $t$
$Toc_{njt}$	Horas ociosas en el recurso $j$ en $n$ en $t$
$Y_{injt}$	Variable binaria que indica si el producto $i$ ha sido producido en el recurso $j$ en $n$ en $t$

## 4.2. Modelo Matemático

### 3.2.1. Objetivo

$$\begin{aligned}
 Max(Z) = & \sum_i^I \sum_n^N \sum_t^T PV_{int} S_{int} - \sum_i^I \sum_n^N \sum_j^J \sum_t^T CPV_{injt} P_{injt} - \sum_n^N \sum_j^J \sum_t^T (CPE_{njt} Tex_{njt} + CPO_{njt} Toc_{njt}) \\
 & - \sum_i^I \sum_n^N \sum_t^T (CMP_{int} CC_{int} + CIN_{int} Inv_{int} + CED_{int} ED_{int}) - \sum_i^I \sum_{no}^{NO} \sum_{nd}^{ND} \sum_l^L \sum_t^T CTN_{inondlt} TNN_{inondlt}
 \end{aligned} \quad (1)$$

La función objetivo (1) incluye las ganancias en primer término y luego las sumatorias de todos los costes. El segundo término es la suma de los costes de producción. El tercer término suma los costes de horas extra y de tiempo ocioso. El cuarto término suma los costes de compra de materiales, inventario y entregas diferidas. El último término suma los costes de transporte. Al final del último período, el coste de entregas diferidas es equivalente al coste de escasez (que es el coste de ventas perdidas) y el coste de inventario es equivalente al coste de obsolescencia (productos que tendrán que ser rematados).

### 3.2.2. Restricciones

$$\sum_{i=1}^I TP_{inj} \left( \sum_{id}^{ID} P_{i=id, nJt} LMD_{id, in} \right) + \sum_{i=1}^I P_{injt} TP_{inj} \leq MAXPN_{njt} + MAXHE_{njt} \quad \forall n, j, t \quad (2)$$

La restricción (2) hace que el tiempo de producción real sea menor que la capacidad máxima en horas normales más horas extra en cada nodo, recurso de producción y periodo. El primer término de la inecuación es para los productos terminados directos; como éstos no generan inventarios de productos intermedios pero sí usan los recursos de producción se debe usar la lista de materiales (LMD) para determinar su carga de trabajo en cada recurso.

$$\left( \sum_{id}^{ID} P_{i=id, nJt} LMD_{id, in} \right) TP_{inj} + P_{injt} TP_{inj} \leq MAXPN_{njt} Y_{injt} + MAXHE_{njt} Y_{injt} \quad \forall i, n, j, t \quad (3)$$

$$\left( \sum_{id}^{ID} P_{i=id, nJt} LMD_{id, in} \right) + P_{injt} \geq MINP_{injt} Y_{injt} \quad \forall i, n, j, t \quad (4)$$

Las restricciones (3) a (4) aseguran que la producción se realice por encima del mínimo posible en los diferentes recursos. En estas tres primeras restricciones el primer término es para los descendientes de los productos directos y el segundo término es para todos los productos terminados, subensambles y componentes.

$$\begin{aligned}
 Inv_{int} = & Inv_{in,t-1} + \sum_j^J P_{injt} + \sum_{no}^{NO} \sum_l^L RTN_{ino, nd=n, lt} + CC_{int} - \\
 & - \sum_{nd}^{ND} \sum_l^L TNN_{i, no=n, ndlt} - S_{int} - \sum_{ip=1}^{IP} (LMI_{ip, in} \sum_j^J P_{i=ip, njt}) \quad \forall i, n, t \quad (5)
 \end{aligned}$$

La restricción (5) calcula el inventario en cada nodo al final de cada periodo. El inventario para un artículo  $i$  es igual al inventario del periodo anterior más la cantidad producida del producto  $i$  en todos los recursos de ese mismo nodo, más las recepciones (producto  $i$  fabricado en otro nodo), más la cantidad comprada (sólo si  $i$  es materia prima), menos los despachos a otros nodos, menos las salidas por ventas (sólo para productos terminados) menos lo que se consume en el mismo nodo para fabricar un producto de nivel inmediato superior que lleve  $i$  (sólo para materias primas y productos intermedios). En esta restricción, cuando  $t = 1$ , el inventario inicial  $Inv_{in,t-1}$  asume el valor del dato  $Inv_{in0}$ .

Los productos terminados directos ( $i = 1, 2, \dots, F$ ) no generan inventarios de productos intermedios y pasan directamente de materia prima a producto final; esto se consigue a través de su lista de materiales (LMI), la cual relaciona la materia prima con el producto terminado directo. Los productos terminados indirectos sí consumen subensambles, éstos consumen componentes y los componentes consumen materias primas. La lista de materiales (LMI) brinda la información para ambos tipos de productos.

$$RTN_{inondlt} = RTNI_{inondlt} + TNN_{inondl,t-TTN_{nondl}} \quad \forall i, no, nd, l, t \quad (6)$$

$$TCN_{inondlt} = TCN_{inondl,t-1} + TNN_{inondlt} - RTN_{inondlt} \quad \forall i, no, nd, l, t \quad (7)$$

Las restricciones (6) y (7) controlan el transporte de productos entre nodos. En la ecuación (6) la recepción de envíos es igual a las recepciones programadas ( $RTNI_{inondlt}$ ) para los primeros  $TTN$  periodos (es decir envíos que se despacharon antes del periodo 1) más los despachos que se realicen a partir del periodo 1 (segundo término del lado derecho de la ecuación). En la ecuación (7) las cantidades en tránsito entre nodos son iguales a la cantidad en transporte del periodo anterior más los despachos iniciados en el mismo periodo menos las recepciones en el mismo periodo. El  $TCN_{inondl,t-1}$  asume el valor del dato  $TCN_{inondl0}$  cuando  $t = 1$ . La restricción (8) impide que se supere la capacidad de almacenaje de los nodos en cualquier periodo.

$$\sum_i^I Inv_{int} V_i \leq VMAXI_{nt} \quad \forall n, t \quad (8)$$

$$\sum_i^I \sum_{no}^{NO} \sum_{nd}^{ND} TCN_{inondlt} V_i \chi_{nondlt}^1 + \sum_i^I \sum_{no}^{NO} \sum_{nd}^{ND} TNN_{inondlt} V_i \chi_{nondlt}^2 \leq VMAXL_{nt} \quad \forall l, t \quad (9)$$

La ecuación (9) limita la cantidad a ser transportada a través de un determinado medio. Suma las cantidades en tránsito más los despachos iniciados en el periodo. Dado que para los envíos con  $TTN$  igual a cero el  $TCN$  (productos en tránsito) es cero, se debe considerar en el segundo término de la ecuación los traslados que se realizan dentro del mismo período. Además, el término a la derecha de la desigualdad puede variar de un período a otro.

$$\sum_i^I CC_{int} CMP_{int} \leq CMAX_{nt} \quad \forall n, t \quad (10)$$

Esta restricción (10) limita la cantidad a comprar de cada nodo en cada periodo. El lado derecho de la desigualdad establece el monto máximo disponible para compra (en unidades

monetarias). Esta es una restricción que depende del presupuesto disponible.

$$ED_{int} = ED_{in,t-1} + D_{int} - S_{int} - S_{i+F,nt} \quad \text{para } i=1, \dots, F, \forall n, t \quad (11)$$

La restricción (11) es sólo para productos terminados, de los cuales hay tanto directos como indirectos. Por cada artículo hay un  $i$  directo y un  $i+F$  indirecto. Si la suma de ambos no es igual a la demanda más los productos pendientes del periodo anterior, entonces habrá pedidos pendientes al final del periodo. Cuando  $t=1$  el  $ED_{in,t-1}$  asume el valor del dato  $ED_{in0}$ . En el último periodo, el  $ED_{inT}$  será el número de productos que faltaron para satisfacer la demanda en esa temporada y por lo tanto, para minimizar su número, se debe poner un coste elevado  $CDE_{inT}$ , así mismo el  $CIN_{inT}$  debe ser elevado para disminuir la obsolescencia (número de artículos que sobran al final de la temporada).

$$Tex_{njt} = \sum_{i=1}^I TP_{inj} \left( \sum_{id}^{ID} P_{i=id,nt} LMD_{id,in} \right) + \sum_{i=1}^I P_{inj} TP_{inj} - MAXPN_{njt} + Toc_{njt} \quad \forall n, j, t \quad (12)$$

La ecuación (12) determina si hay horas extra o tiempo ocioso en cada recurso, nodo y periodo. Si la producción del periodo (dos primeros sumandos del lado derecho) es mayor que la capacidad máxima en horas normales (tercer término del lado derecho) entonces  $Tex$  tendrá valor positivo y  $Toc$  será cero. Si la producción es igual que la capacidad tanto  $Tex$  como  $Toc$  serán cero y si la producción es menor que la capacidad,  $Toc$  será positivo y  $Tex$  será cero.

$$P_{njt} \geq 0 \quad \forall i, n, j, t \quad (13)$$

$$S_{int}, ED_{int}, Inv_{int}, CC_{int} \geq 0 \quad \forall i, n, t \quad (14)$$

$$RTN_{inondlt}, TCN_{inondlt}, TNN_{inondlt} \geq 0 \quad \forall i, no, nd, l, t \quad (15)$$

$$Tex_{njt}, Toc_{njt} \geq 0 \quad \forall n, j, t \quad (16)$$

Las restricciones (13) a (16) son de no negatividad para las variables de decisión.

## 5. Condiciones de los contratos

En el apartado dos se indica que los proveedores requieren que se subcontrate la producción “en firme” con cierta anticipación (varios periodos para los proveedores extranjeros y pocos periodos para los proveedores nacionales) y de forma “indicativa” para periodos posteriores. A esta anticipación mínima se le llama “plazo de entrega” (PE) y es diferente para cada proveedor. Además, los proveedores requieren que la diferencia entre la cantidad subcontratada en un periodo y la del siguiente no sea muy elevada y por lo tanto fijan un límite a dicha variación ( $\beta$ ); esta diferencia puede aumentar (fijando valores de  $\beta$  mayores) a medida que los dos periodos considerados están más lejos en el futuro.

Si en cada periodo  $t$  se compromete “en firme” la producción del periodo  $t+PE$ , se denomina  $COM_t(k)$  al compromiso hecho en el periodo  $k$  para ser entregado en el periodo  $t$  para  $t=k+PE$ . Entonces, cada nuevo pedido comprometido ( $PC_t$ ) debe satisfacer:

$$(1 - \beta_t) COM_t(k) \leq PC_t \leq (1 + \beta_t) COM_t(k) \quad \text{para } 0 \leq \beta_t \leq 1, \text{ para } t=k+PE \quad (17)$$

Para lograr lo anterior es necesario que el modelo se ejecute bajo el esquema de horizonte



rodante considerando los primeros PE periodos como pedidos comprometidos en todos los proveedores. En el modelo se asume que los proveedores extranjeros pueden enviar (TNN) sus componentes, productos intermedios y  $pt$  a los proveedores locales y que sólo los proveedores locales tienen demanda externa, así en la restricción (5) de inventario sólo los proveedores locales de  $pt$  usarán el término  $S_{int}$ . Con el enfoque rodante, el modelo propuesto se ejecuta  $T$  veces ( $T$  = número de periodos del horizonte de planificación) y se agrega un índice  $u$  a todas las variables y parámetros para identificar sus valores en cada ejecución ( $u=1, \dots, T$ ). La primera ejecución del modelo, EJE(1), se resuelve considerando datos (como datos) los valores de los envíos ( $TNN$ ) y los suministros ( $S_{int}$ ) de los primeros PE periodos; para generalizar se llama  $ES_t(u)$  a estas variables de decisión de manera que si, por ejemplo, asumimos que el PE es de 3 periodos, entonces para la primera ejecución  $ES_1(1)$ ,  $ES_2(1)$  y  $ES_3(1)$  son los valores comprometidos iniciales.

Luego el modelo es “rodado” cambiando el inicio al periodo  $t=2$  y los pedidos comprometidos para los nuevos tres primeros periodos toman los valores  $ES_1(2) = ES_2(1)$ ,  $ES_2(2) = ES_3(1)$  y  $ES_3(2) = PC_4(1)$ . El  $PC_4(1)$  es el  $TNN$  de los proveedores extranjeros y el  $S_{int}$  de los proveedores locales del periodo 4 de la primera ejecución del modelo. Así, el  $PC_t$  del primer periodo después del PE se convierte en pedido comprometido de la siguiente ejecución. Se incluye la ecuación (17) en la segunda ejecución, EJE(2), y los pedidos flexibles para los siguientes periodos asumen el valor  $COM_t(2) = PC_{t+1}(1)$  para  $t > 3$  (bajo el supuesto de  $PE=3$ ). Esto se repite para todo el horizonte de planificación “rodando” los pedidos comprometidos y flexibles; al final los pedidos del cuarto periodo en cada ejecución se consideran como los pedidos más realistas a los proveedores (Barbarosoglu; 2000). Este procedimiento se sistematiza de la siguiente manera:

- I. Hacer  $u=1$  y ejecutar el modelo EJE(1) usando los compromisos  $ES_t(u)$  de los PE primeros periodos para determinar  $PC_{PE+1}(u)$ .
- II. “Rodar” el primer periodo y poner como tiempo de inicio el siguiente periodo, y hacer  $u=u+1$ .
- III. Actualizar los inventarios iniciales.
- IV. Actualizar los pedidos comprometidos:  $ES_1(u)=ES_2(u-1)$ ,  $ES_2(u)=ES_3(u-1), \dots$ ,  $ES_{PE}(u)=PC_{PE+1}(u-1)$ .
- V. Actualizar los pedidos flexibles:  $COM_t(u) = PC_{t+1}(u-1)$  para  $t = PE, \dots, T-u+1$ .
- VI. Agregar la restricción (17) incluyendo  $COM_t(u)$ .
- VII. Resolver EJE( $u$ ).
- VIII. Repetir los pasos II a VII hasta el final del horizonte de planificación.

## 6. Conclusiones

El modelo propuesto permite obtener soluciones óptimas y proporciona las cantidades de productos terminados a fabricar en forma directa y en forma indirecta (con aplazamiento), asimismo las cantidades de productos intermedios y componentes a producir y transportar, y cuándo hacer el ensamble final (tanto en el proveedor lejano como en el nacional). Gracias a su estructura, se puede tener componentes compartidos por los distintos productos finales y se facilita su transporte y control de inventarios.

Mediante el enfoque de horizonte rodante se puede planificar los pedidos a los proveedores de manera que se cumpla con sus requerimientos de plazo de entrega y de cambio en el tamaño

de los pedidos. Esto permitirá contratar capacidades con adecuada anticipación.

Además, a partir de cada solución se puede hallar el nivel de servicio de cada producto terminado y el general, y compararlo con las otras alternativas. También se puede hallar el beneficio por producto de manera que se pueda decidir de cuál conviene producir mayor o menor cantidad (por esto es mejor que un modelo que sólo minimiza costes).

El modelo se ha implementado en MPL-CPLEX y para su ejecución con horizonte rodante se ha desarrollado un algoritmo en Delphi, el cual además permite hacer análisis de sensibilidad para determinar en qué condiciones compensará contratar la producción a proveedores cercanos frente a proveedores lejanos o a ambos en distintos periodos y cantidades.

Este modelo se puede ampliar para considerar economías de escala en los costes de transporte y compra de materiales, tamaño mínimo y máximo del lote de producción, contratación y despido de la mano de obra directa, etc. El modelo es determinista pero se puede modificar para considerar la demanda y otros parámetros con incertidumbre. Se puede seguir el enfoque de Peidro et al. (2007) mediante lógica difusa (fuzzy) o el de Leung y Ng (2007b) mediante programación estocástica de dos etapas con cambio de plan y análisis de escenarios.

## Referencias

Arntzen, B.C.; Brown, G.G.; Harrison, T.P.; Trafton, L.L. (1995). "Global Supply Chain Management at Digital Equipment Corporation". *Interfaces*, 25(1):69-93.

Barbarosoglu, G. (2000). "An integrated supplier-buyer model for improving supply chain coordination". *Production Planning & Control*, 11(8):732-741.

Calderón-Lama, J-L.; García-Sabater, J-P.; Lario, F-C. (2008). "Estado del arte de la planificación de la producción para la contratación de producción a proveedores industriales en una Cadena de Suministro". *XII Congreso de Ingeniería de Organización. 2<sup>nd</sup> International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management*. Burgos.

Chern, C.-C.; Hsieh J.-S. (2007). "A heuristic algorithm for master planning that satisfies multiple objectives". *Computers & Operations Research*, 34(11):3491-3513.

Christopher, M.; Peck, H.; Towill, D. (2006). "A taxonomy for selecting global supply chain strategies". *The International Journal of Logistics Management*, 17(2):277-287.

Fisher, M.; Hammond, J.; Obermeyer, W.; Raman, A. (1994). "Making supply meet demand in an uncertain world". *Harvard Business Review*, 72(3):83-93.

Lee, Y.H.; Kim, S.H.; Moon, Ch. (2002). "Production-distribution planning in supply chain using a hybrid approach". *Production Planning & Control*, 13(1):35-46.

Leung, S.C.H.; Ng, W-L. (2007a). "A goal programming model for production planning of perishable products with postponement". *Computers & Industrial Engineering*, 53(3):531-541.

Leung, S.C.H.; Ng, W-L. (2007b). "A stochastic programming model for production planning of perishable products with postponement". *Production Planning & Control*, 18(3):190-202.

Peidro, D.; Mula, J.; Poler, R. (2007). "Supply chain planning under uncertainty: a fuzzy linear programming approach". Fuzzy Systems Conference. IEEE International. Vol. 1:1-6.



## **Modelo de Simulación Dinámica para Ensayar Políticas Operacionales en la Cadena de Suministro Madera-Muebles**

**Wilfredo Guaita<sup>1</sup>, Carlos Rodríguez Monroy<sup>2</sup>, Miguel Nuñez<sup>3</sup>, Marian Gómez<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Centro de Investigación Gerencial de Guayana, Universidad de Guayana, Puerto Ordaz, Venezuela. wguaita@uneg.edu.ve; mgomez@uneg.edu.ve

<sup>2</sup> Dpto. de Organización, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid, Calle José Gutiérrez Abascal, 2. 28010. Madrid. crmonroy@etsii.upm.es

<sup>3</sup> Centro de Investigación y Desarrollo en Ingeniería Industrial, Universidad Politécnica Antonio José de Sucre, Puerto Ordaz, Venezuela. mnunezb@cantv.net

### **Resumen**

*Con el fin de determinar el impacto que causa en la Cadena de Suministro Madera-Muebles las variaciones de demanda, y de cómo las políticas operacionales de capacidad, inventario o procesos pueden mitigar este impacto, se diseñó un modelo de simulación dinámica sobre la base de una muestra de 20 carpinterías ubicadas en el municipio Piar del Estado Bolívar, Venezuela y sus relaciones con los suministradores de materia prima y distribuidores de productos terminados. La estructura de la cadena contempla en principio tres aserraderos, un centro de acopio de la madera y cinco carpinterías. Estas pequeñas empresas, excepto el centro de acopio que todavía no está construido, habitualmente trabajan de manera individual, pero han comprendido que integrarse en una cadena mejora la competitividad de todos sus integrantes. En ese sentido, la aportación fundamental de este trabajo, es que pueda servir de apoyo o contribuir a reducir la incertidumbre en la toma de decisiones del administrador de la cadena, por lo rápido que puede analizar cuál política individual o combinada es mejor que otra ante un cambio en la demanda antes de ponerla en práctica y por otro lado puede reducirse el efecto Bullwhip*

**Palabras Claves:** Cadena de Suministro, Dinámica de Sistema, Simulación, Políticas Operacionales y Efecto Bullwhip

### **1. Introducción**

Las Pequeñas y Medianas Empresas (PYMES), representan uno de los principales motores del crecimiento de la inversión productiva, del empleo y de la competitividad de cualquier región o país. Esta es una realidad que confirman diversos estudios y experiencias en distintos países. A manera de ejemplo, se considera que las PYMES representan, en promedio, en los países latinoamericanos un 90% de las empresas, emplean alrededor del 70% de la mano de

obra y contribuyen, en promedio, entre un 20 y un 30% al Producto Interno Bruto. En Venezuela, las PYMES y las microempresas integran más del 90% de las empresas, con un registro de Pequeñas y Medianas de aproximadamente 6.137, según datos del Instituto Nacional de Estadística, correspondiente al año 2005.

En este contexto y a lo largo de los últimos años, han sucedido múltiples cambios, en la economía mundial consecuencia de las innovaciones tecnológicas, de la creación de bloques comerciales entre países y de la creciente ola globalizadora que impacta a muchos sectores industriales, entre ellos a las PYMES, lo que genera una gran interrogante ¿De qué manera, este sector, puede enfrentar estos cambios para no desaparecer del mercado o en el mejor de los casos ser exitoso?, la respuesta a esta interrogante, representa un desafío que debe afrontar la dirección de la empresa que aspira a mantenerse competitiva. Muchas estrategias gerenciales y técnicas están disponibles para enfrentar este desafío, y han sido usadas con éxito en algunos sectores industriales.

En este sentido, una opción competitiva para las PYMES transformadoras de materia prima, y considerada dentro de las estrategias asociativas, es buscar modos de integración en cadenas de suministros Cassivi (2006), y utilizar técnicas avanzadas para la toma de decisiones, como lo es la simulación de procesos, Chang y Makatsoris (2001). El uso de esta técnica contribuye a reducir la incertidumbre generada por una demanda cambiante, que afecta las operaciones de los flujos de abastecimiento de materia prima, los procesos internos de transformación, y la distribución de productos a clientes finales, y a reducir el efecto látigo (Bullwhip) creado por los excesos de pedidos de los componentes de la cadena.

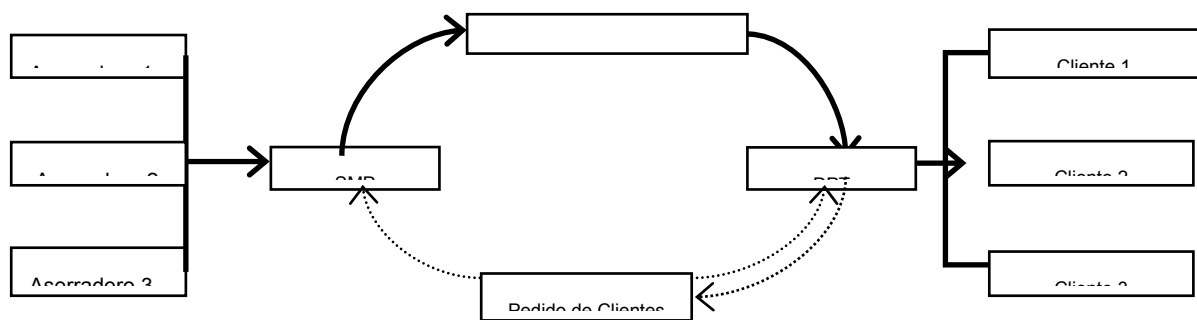
En este estudio en primer lugar se hace la configuración de la CS M-M y posteriormente se desarrollará el modelo informático sobre el cual se harán las simulaciones o ensayos de las políticas operacionales del tipo: Proceso, Capacidad o Inventario. Finalmente, se observará en cada uno de los ensayos, el comportamiento en el nivel de pedidos pendientes, que dará lugar a conclusiones, que puedan ser útiles para la cadena de suministro.

## **2. Metodología**

Como metodología para la realización de este estudio se aplicó en primer lugar las fases para el desarrollo del modelo de eventos discretos, Guasch et al. (2003), y posteriormente se utilizó la técnica de lazos retroalimentados, Martín (2003) que facilita el desarrollo del modelo de procesos continuos aplicando las siguientes etapas: Articulación del problema, determinar hipótesis dinámicas, formular el modelo de simulación, evaluar el modelo y diseño de políticas y evaluación, Sterman (2000)

## **3. Resultados**

Los resultados de la simulación muestran la optimización de recursos de la estructura de la cadena (ver figura 1) que procura tener cero entidades en cola. Esta optimización indicó un recurso en el suministrador, seis en el transformador y tres en el distribuidor de productos.

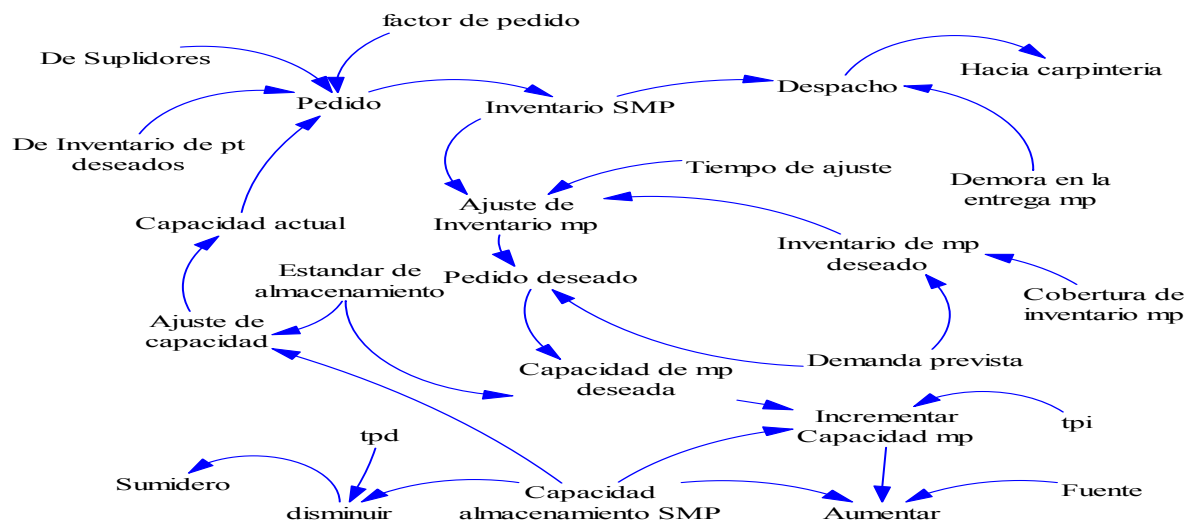


**Figura 1:** Estructura de la Cadena de Suministro Madera-Mueble

Los resultados de la optimización son valores iniciales para el modelo de simulación de procesos continuos donde se realizan los ensayos con políticas operacionales, Schroeder (2005), dado un nivel de demanda preestablecido. Por ejemplo, en el ensayo 1, que sirve de base, se mantiene constante el nivel de pedidos a lo largo del lapso de simulación, y se fijan los valores del protocolo de ensayo que contempla: Parámetros de Decisión, Volúmenes del Sistema, Tasas de Flujo y Políticas Operacionales. Con este ensayo número 1, se fija la primera referencia de comportamiento y en el ensayo 2 se introducen cambios en la demanda y se hacen ajustes en las políticas operacionales.

### 3.1. Modelo Causal Cadena de Suministros Madera-Muebles

En la figura 2, se muestran las relaciones causales o de influencia propias del suministrador de materia prima, donde se señala la demanda prevista y su relación con el pedido deseado e inventario de materia prima deseado. El pedido deseado ya ajustado por la diferencia entre inventario de materia prima deseado e inventario de materia prima real, indica la capacidad de almacenamiento de materia prima deseada que al dividirla entre el estándar de almacenamiento especifica la capacidad de almacenamiento. Este nivel de capacidad de almacenamiento, da como resultado la capacidad de almacenamiento ajustada, que después de una demora se traduce en la capacidad de almacenamiento actual. Contra este valor se confronta el pedido. Es decir, si el pedido es inferior a la capacidad actual de almacenaje se acepta el pedido, si resulta superior se pide lo que indica la capacidad actual.

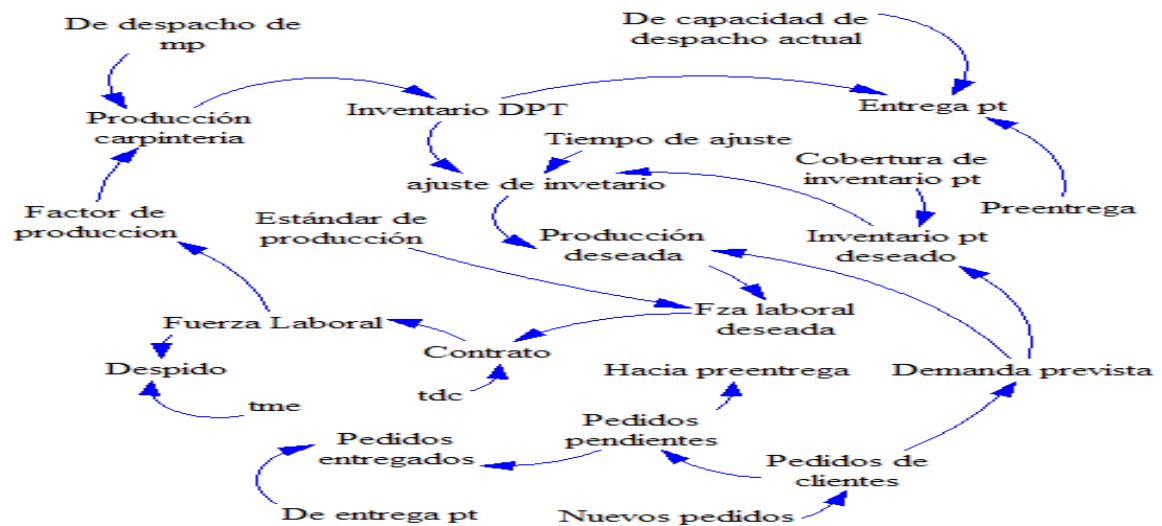


**Figura 2:** Suministrador de Materia Prima

La figura 3, especifica las relaciones entre producción en carpintería y almacenamiento en distribuidor de productos terminados. Se agregan las relaciones con fuerza laboral y la incidencia de los pedidos de clientes. La demanda prevista impulsa la producción deseada y el inventario deseado que hay que ajustar contra el inventario real en un lapso de tiempo establecido para adaptarlo a la demanda. La producción deseada una vez que el inventario está ajustado, da la pauta para determinar la mano de obra deseada, que dividida entre el estándar de producción indica la cantidad de fuerza laboral que debe ser contratada.

Al igual que se hizo en el SMP, hay que observar la capacidad de entrega para verificar la cantidad a despachar. Aquí se introduce el término preentrega. Si éste es menor que el inventario real se entrega la cantidad de pedido preentregado, si es mayor se entrega lo existente en el inventario. Seguidamente, si lo existente en el inventario resulta menor que la capacidad de despacho del pedido se entrega lo del inventario pero si es mayor se entrega lo que la capacidad indique.





**Figura 3:** Carpintería e Inventario del Distribución de Productos Terminados

La figura 4, señala las relaciones inherentes al nivel de capacidad del DPT, donde la demanda prevista se relaciona con la entrega deseada, la cual dividida entre el estándar determina la capacidad de despacho de productos terminados, que después de ser ajustada en un período de tiempo determina la capacidad de despacho actual.



**Figura 4:** Capacidad de Despacho en DPT

Las relaciones causales o de influencia entre SMP, carpintería e inventario del DPT y capacidad del DPT, mostradas en las tres últimas figuras se expresan en un modelo informático el cual sirve de base para ensayar las políticas operacionales que correspondan y que son explicadas en el ensayo 1 y 2.

#### 4. Resultado y Discusión de los Ensayos CS Madera-Muebles

Los resultados de dos ensayos en la cadena de suministro Madera-Mueble son mostrados en esta sección. En el ensayo 1, que sirve de base, se mantiene constante el nivel de pedidos a lo largo del lapso de simulación, y se fijan los valores del protocolo de ensayo que contempla: Parámetros de Decisión, Volúmenes del Sistema, Tasas de Flujo y Políticas Operacionales. Con este ensayo número 1, se fija la primera referencia de comportamiento. En el ensayo 2 se introducen cambios en la demanda y se hacen ajustes en las políticas operacionales. Estos ensayos permitirán observar el nivel de pedidos pendientes de la cadena.

### 3.2. Ensayo 1: Pedido Constante de Clientes

En este ensayo de simulación, comprobaremos los efectos en la cadena de suministro Madera-Mueble, cuando los pedidos de clientes son constantes (20 metros cúbicos por semana) a lo largo de la simulación.

Parámetros de decisión:

1. Longitud del intervalo de tiempo = 1 Semana
2. Capacidad inicial fija en SMP =  $50 \text{ M}^2 / \text{S}$
3. Capacidad inicial fija en DPT =  $30 \text{ M}^2 / \text{S}$
4. Demora en entrega de materia prima = 4 Semanas
5. Factor para calcular promedio móvil = 10 Semanas
- 6. Factor de pedido = 20 Metros Cúbicos por Semana**
7. Factor de cobertura inventario de productos terminados deseado = 4 S
8. Estándar de almacenamiento de materia prima en SMP =  $50 \text{ M}^3 / \text{M}^2 / \text{S}$
9. Estándar de despacho de productos terminados en DPT =  $30 \text{ M}^3 / \text{M}^2 / \text{S}$
10. Estándar de producción en carpintería =  $5 \text{ M}^3 / \text{H} / \text{S}$
11. Ratio de materiales en carpintería = 0.80 Unidad de Producto Terminado por Unidad de Materia Prima.
12. Tiempo de la simulación = 52 S

Volúmenes en la cadena:

1. Nivel inicial de pedidos pendientes =  $0 \text{ M}^3$

2. Nivel inicial de inventario de productos terminados en DPT =  $25 \text{ M}^3$
3. Nivel inicial de inventario materia prima en SMP =  $50 \text{ M}^3$
4. Nivel inicial para ajuste de Cap. de Almac. Materia Prima =  $0 \text{ M}^2$
5. Nivel inicial para ajuste de Cap. de Despach. Productos Terminados =  $0 \text{ M}^2$
6. Nivel inicial para ajuste de Capacidad de Fuerza Laboral = 6 H

Tasa de flujo:

1 Pedido de clientes = 20 metros cúbicos, constante a lo largo del período de simulación.

Políticas operacionales:

1. Fuerza laboral variable, incrementa o disminuye en atención a la demanda.
2. Inventario de productos terminados con una cobertura de 4 semanas.
3. Pedidos fijos.
4. Capacidad inicial de almacenamiento de materia prima y de despacho de productos terminados = 50 y  $30 \text{ M}^2$  respectivamente.
5. Estándar de almacenamiento de materia prima =  $50 \text{ M}^3 / \text{M}^2 / \text{S}$
6. Estándar de despacho de productos terminados =  $30 \text{ M}^3 / \text{M}^2 / \text{S}$
7. Estándar de producción =  $5 \text{ M}^3 / \text{H} / \text{S}$ .
8. Estándar de materiales = 0.80 ratio de utilización de madera ajustado por fuerza laboral
9. Demora en el despacho de materia prima = 4 semanas

#### 4.1.1 Resultado y Discusión del Ensayo 1

Las figuras 5, 6 y 7 se muestran los resultados de 52 iteraciones realizadas en el simulador. La variable externa que se mantiene sin cambios es lo que representa los pedidos de clientes a razón de 20 metros cúbicos por semana (ped\_clientes). Los pedidos entregados (ped\_entreg) se igualan a esta tasa rápidamente en la semana 3 y la tasa de producción oscila alrededor de la tasa de pedidos de clientes lo que significa que el sistema está en equilibrio (ver figura 5). La tasa de pedido de materia prima también se ajusta a la tasa de pedido de clientes disminuyendo desde 50 hasta 22 unidades en las 10 primeras semanas y se mantiene en 25 unidades hasta el final de la simulación. Este comportamiento de igualación hacia la tasa de pedidos sin oscilaciones muy apreciables hace suponer un sistema estable pero que va acumular algo de materia prima dada la política de inventario presente, como se observa en la figura 6. El nivel de inventario de materia prima se mantiene por encima del nivel de inventario de productos terminados, como debe ser dado el estándar de materiales asumido. El inventario de productos terminados deseado se ubica en 80 unidades ( $20 \text{ unidades/semana} \times 4$

semanas de cobertura) y debajo de este nivel se ubica el inventario de productos terminados acercándose en una trayectoria tipo función logística (ver figura 6).

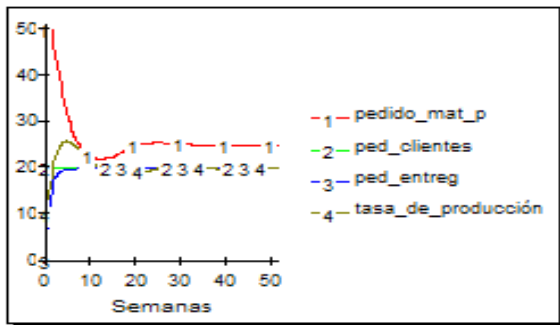


Figura 5: Tasas ensayo 1 M-M

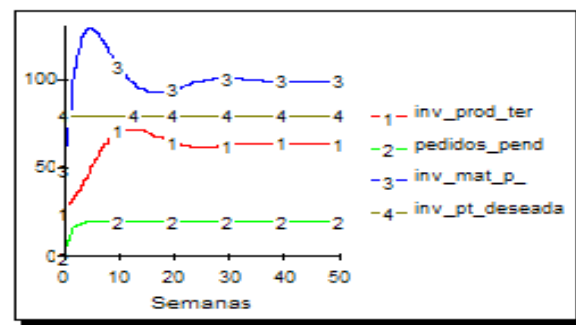


Figura 6: Niveles ensayo 1 M-M

Los pedidos de clientes se entregan satisfactoriamente a una tasa de 20 por semana ya que hay inventario de producto terminados suficientes para no crear retrasos en el pedido. El nivel de inventario de productos terminados se incrementa y estabiliza en 64 unidades por semana. El nivel de fuerza laboral que se inicia con 6 personas, baja hasta 4 al final de la simulación, cantidad suficiente para cumplir con los pedidos, dado que cuatro personas multiplicada por el estándar de producción de 5 unidades/hombre/semana, da un total de 20 unidades por semana (ver figura 7). Las capacidades de almacenamiento y despacho permanecen fijas en este ensayo.

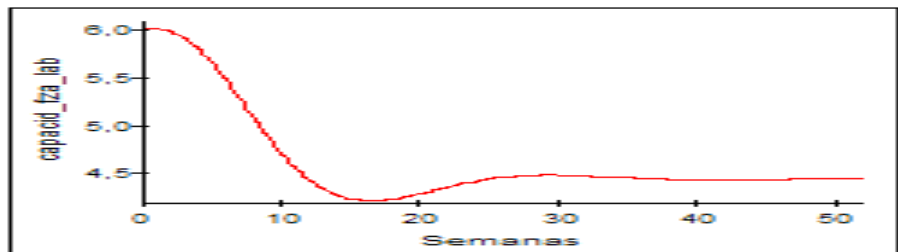


Figura 7: Niveles Continuación ensayo 1 M-M

Como conclusión de este ensayo, las políticas de mantener una capacidad inicial fija para inventario de materia prima y de productos terminados, en 50 y 30 unidades respectivamente, es más que suficiente para cubrir la demanda, dado que el inventario de productos terminados al final de la simulación es de 64 unidades por semana y los pedidos de clientes es de 20. Es decir, la cobertura para inventarios de seguridad de cuatro semanas parece excesiva. La política de capacidad relativa a la fuerza laboral produce pocos despidos en este ensayo y la política de inventarios relativa a la cobertura para previsión como inventario de seguridad puede disminuirse de cuatro a dos semanas con el objeto de reducir el inventario de productos terminados.

#### **4.2 Pedido Constante de Clientes con Ajuste en Política de Inventario.**

En este ensayo se mantiene constante los pedidos de clientes pero en 10 metros cúbicos por semana y se reduce la cobertura para inventario de seguridad de 4 a 2 semanas. Esta variación en la política de inventarios procura inducir a la baja el inventario de productos terminados. También se introducen en este ensayo las variaciones de capacidad de almacenamiento de materia prima y despacho de productos terminados.

Parámetros de decisión:

1. Longitud del intervalo de tiempo = 1 semana
- 2. Capacidad inicial fija en SMP =  $50 \text{ M}^2 / \text{S}$  , con ajustes por variación de demanda.**
- 3. Capacidad inicial fija en DPT =  $30 \text{ M}^2 / \text{S}$ , con ajustes por variación de demanda.**
4. Demora en la entrega materia prima = 4 semanas
5. Factor para calcular promedio móvil = 10 semanas
- 6. Factor de pedido = 10 unidades por semana**
- 7. Factor cobertura inventario de productos terminados deseado = 2 S**
8. Estándar de almacenamiento de materia prima en SMP =  $50 \text{ M}^3/\text{M}^2/\text{S}$
9. Estándar de despacho de productos terminados en DPT =  $30 \text{ M}^3/\text{M}^2/\text{S}$
10. Estándar de producción en carpintería =  $5 \text{ M}^3/\text{H}/\text{S}$
11. Ratio de materiales en carpintería = 0.80 Unidad de Producto Terminado por Unidad de Materia Prima.
12. Tiempo de la simulación = 52 S

Volúmenes en la cadena:

1. Nivel inicial de pedidos pendientes =  $0 \text{ M}^3$
2. Nivel inicial de inventario de productos terminados en DPT =  $25 \text{ M}^3$
3. Nivel inicial de inventario materia prima en SMP =  $50 \text{ M}^3$
4. Nivel inicial para ajuste de Cap. de Almac. Materia Prima =  $0 \text{ M}^2$
5. Nivel inicial para ajuste de Cap. de Despac. Productos Terminados =  $0 \text{ M}^2$
6. Nivel inicial para ajuste de Capacidad de Fuerza Laboral = 6 H

Tasa de flujo:

1. Pedido de clientes = 20 metros cúbicos de pedido constante a lo largo del período de simulación.

Políticas operacionales:

1. Fuerza laboral variable, incrementa o disminuye en atención a la demanda.

2. Inventario de productos terminados con una cobertura de 2 semanas para inventario de seguridad.

3. Pedido fijo en 10 unidades.

4. Capacidad de almacenamiento de materia prima y capacidad de despacho de productos terminados = 50 y 30  $M^2$  respectivamente.

5. Estándar de almacenamiento de materia prima = 50  $M^3/M^2/S$

6. Estándar de despacho de productos terminados = 30  $M^3/M^2/S$

7. Estándar de producción = 5  $M^3/H/S$ .

8. Estándar de materiales = 0.80 ratio de utilización de madera ajustado por fuerza laboral.

9. Demora en el despacho de materia prima = 4 semanas

#### **4.2.1 Resultado y Discusión del Ensayo 2**

Las figuras 8, 9 y 10 muestran los resultados de la simulación. La variable externa que se mantiene sin cambios a lo largo del período a simular, es los pedidos de clientes a razón de 10 unidades por semana (ped\_clientes). Los pedidos entregados (ped\_entreg) se igualan a esta tasa, rápidamente en la semana 3. La tasa de producción se iguala a la tasa de pedidos de clientes en la semana 10 después de oscilar levemente y así se mantiene hasta el final de la simulación (ver figura 8). El pedido de materia prima se incrementa hasta un nivel de 16 unidades en la semana 10 y luego baja hasta un nivel de 12 por semana y así se mantiene hasta el final, siempre por encima del nivel de pedidos de clientes dada la diferencia entre inventario deseado y real. El nivel de inventario de materia prima sube desde 50 hasta 56 unidades en la semana 13 y se mantiene más o menos constante en 50 unidades siempre por encima del nivel de inventario de productos terminados que su máximo pico es de 32 en semana 2. El inventario de productos terminados deseado se ubica en 20 unidades (10 unidades/semanas x 2 semanas de cobertura). El inventario de productos terminados oscila suavemente y se mantiene en 16 siempre por debajo del inventario de productos terminados deseados pero después de la semana 8 (ver figura 9).

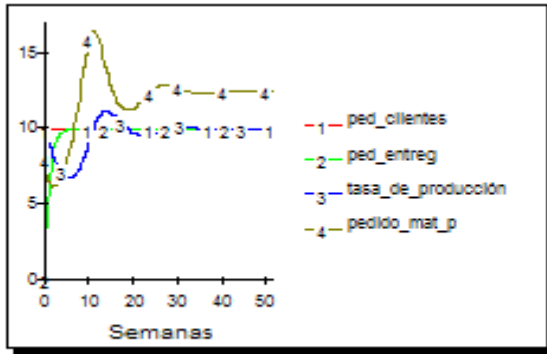


Figura 8: Tasas ensayo 2 M-M

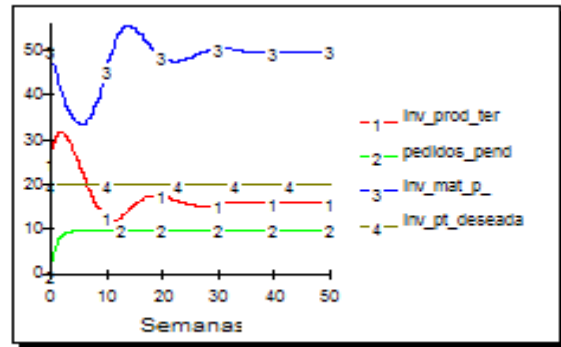


Figura 9: Niveles ensayo 2 M-M

Los pedidos de clientes se entregan satisfactoriamente a una tasa de 10 por semana y así se mantiene durante todo el período de simulación, con holgura suficiente porque mantiene un inventario de 16 unidades contra 10 entregadas cada semana. El nivel de fuerza laboral que inicia con 6 personas baja hasta 2 hasta el final de la simulación, cantidad suficiente para cumplir con los pedidos, dado que dos personas multiplicadas por el estándar de producción de 5 unidades/hombre/semana da un total de 10 unidades por semana, ver figura 10. La capacidad de almacenamiento se ubica en 0.14, valor que multiplicado por el estándar de almacenamiento se traduce en 7 unidades por semana aspecto, que señala la poca necesidad de hacer ajustes en la capacidad de almacenamiento, dado que la capacidad de almacenamiento actual es fija en 50 unidades por semana.

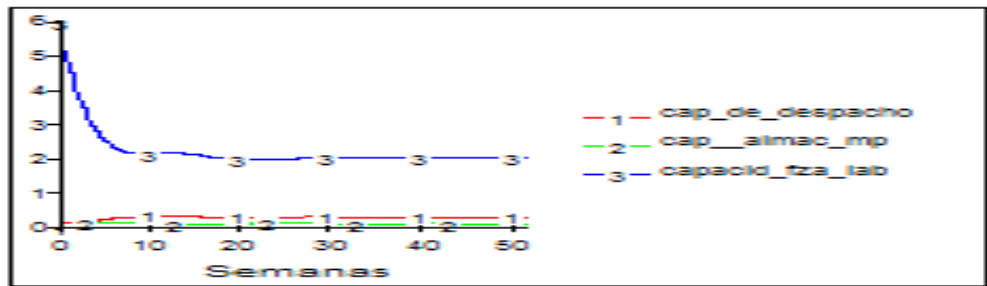


Figura 10: Niveles continuación ensayo 2 M-M.

De igual manera se comporta la capacidad de despacho que se ubica en 0.36 para totalizar 11 unidades por semana, que es el producto de multiplicar el nivel por el estándar de despacho, esto indica la no necesidad de hacer ajustes. Como conclusión de este ensayo, la disminución el factor de pedido de 20 a 10 unidades por semana, según la demanda establecida, trae consigo una disminución del nivel de inventario de productos terminados de 16 unidades, sin afectar la entrega de pedidos al cliente y a menor costo por inventario de productos terminados. Las políticas de mantener capacidad fija inicial para inventario de materia prima y de productos terminados, en 50 y 30 unidades de almacenamiento y despacho

respectivamente, manteniendo constante la demanda es superior a lo necesario. También se puede decir que la cobertura de inventario de dos semanas sigue siendo suficiente para cumplir con los pedidos y la disminución acelerada de la fuerza de trabajo puede producir conflictos con los trabajadores.

## Conclusiones

Como una primera conclusión, se tiene que manteniendo fija la capacidad inicial para inventario de materia prima y de productos terminados, es suficiente para cubrir una demanda preestablecida como constante a lo largo del período de simulación, dado que el inventario de productos terminados al final de la simulación es superior al nivel de pedido de los clientes.

Una segunda conclusión en este modelo, es que disminuyendo el factor de pedido y manteniendo la misma política de capacidad fija para inventario de materia prima y de despacho de productos terminados para el nivel de demanda constante, trae consigo una disminución del nivel de inventario de productos terminados que no afecta la entrega de pedidos al cliente.

Finalmente como conclusión número 3, las políticas de capacidad inicial fijas para inventario de materia prima y de productos terminados también puede ser suficiente para cubrir el crecimiento escalonado en el flujo de pedido de clientes.

## Referencias

Cassivi, L. (2006). "Collaborations planning in a supply chain". *Supply Chain Management*, 11(3):249.

Chang, Y., y Makatsoris, H. (2001). «Supply chain modeling using simulation». *International Journal of Simulation*, 2(1):24–30.

Guasch, et al., (2003). *Modelado y simulación, aplicaciones a procesos logísticos de fabricación y servicios* (2ª ed.). Barcelona: UPC

Martín, J. (2003). *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*. Barcelona: UPC

Schroeder, R. (2005). *Administración de operaciones. Conceptos y casos contemporáneos* (2ª ed.). México: Mc Graw Hill.

Sterman, J. (2000). *Business dynamics: Systems thinking and modeling for a complex world*. USA: Mc Graw Hill.